

VU Research Portal

Life cycle and ecology of the loggerhead turtle (*Caretta caretta*, Linnaeus, 1758): development and application of the Dynamic Energy Budget model

Marn, N.

2016

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Marn, N. (2016). *Life cycle and ecology of the loggerhead turtle (*Caretta caretta*, Linnaeus, 1758): development and application of the Dynamic Energy Budget model*. [PhD-Thesis – Research external, graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Sažetak

Uvod

Glavna motivacija dok sam započinjala ovo putovanje, koje je rezultiralo (ali ne završava) doktoratom znanosti, bila je doznati koliko štete uzrokuje dopuštajući da plastičan otpad dospijeva u morski ekosustav. Opće je poznato da je plastici potrebno jako puno vremena za raspad; naposljetku, izdržljivost plastike je ono što je i učinilo plastiku tako korisnom i, posljedično, sveprisutnom! Dakle, gdje točno odlazi sva ta plastika? Da li tone? Da li pluta po oceanima, putujući vječno morskim strujama? Da li je pojedena od strane morskih organizama? I ako da, što se događa onda?

Postoje izvještaji o interakciji gotovo tristo različitih vrsta morskih organizama s našim plastičnim otpadom. Zapetljavaju se u njega, jedu ga, ili ga koriste kao transportno sredstvo kako bi stigle u nova područja, gdje su ponekad toliko uspješne da "istisnu" autohtone vrste. I dok biti pričvršćen na komad plutajuće plastike u potrazi za novim ekosustavima možda zvuči kao obećavajući novi početak, biti zapetljan u odbačenu ribarsku mrežu, ili umrijeti od izgladnjivanja zbog previše zabunom pojedene plastike, zvuči puno manje primamljivo. Drugi scenarij je, međutim, puno učestaliji, i njega proživljavaju morske kornjače.

Morske kornjače su fantastična stvorenja. Nepromijenjenoga izgleda, postoje već preko 150 milijuna godina - što znači da su živjele u isto vrijeme, a onda i daleko nadživjele, velike dinosauruse! Fasciniraju ljude već od ranih civilizacija, ali fascinacija im nije pomogla, jer se svih sedam vrsta morskih kornjača koje trenutno postoje nalazi na IUCN listi ugroženih vrsta, a brojnost većine populacija je u opadanju usprkos zaštiti. Učinkovitost zaštite ovisi i o tome koliko se vrste mogu prilagoditi pritiscima prisutnima u okolišu. Plastika predstavlja najveću opasnost za vrste koje dugo žive, jer je mogućnost takvih vrsta da se prilagode promjenama u okolišu ograničena. Morske kornjače se kao dugo živuće vrste nalaze u ovoj kategoriji.

Glavate želve (*Caretta caretta*, Linnaeus 1758) prisutne su u umjerenoj klimatskoj zoni svih svjetskih oceana, evoluirajući u nekoliko populacija i lokalnih subpopulacija. Žive duže od 65 godina, a njihov spol određen je temperaturom inkubacije tijekom zadnje trećine embrionalnog razvoja (koji traje oko dva mjeseca). Tijekom svog života, mogu narasti do veličine čak 25 puta veće od one pri izlijezanju: u prosjeku 4 cm dugačka i 20 g "teška" kornjačica koja izađe iz gnijezda, može postati odrasla jedinka teška preko 100 kg s oklopom dugačkim 100 do 130 cm. Ženke dolaze položiti jaja na istu plažu na

kojoj su se izlegle, zbog čega ponekad preplivaju stotine kilometara. Ova dva trenutka (izlijeganje iz jaja i polaganje jaja) su jedina dva trenutka tijekom njenog dugog života, kada kornjača ima doticaj s kopnenim staništem. Posljedično, plaža i obalno more su dugo vremena bila jedina dva područja gdje su ljudi mogli promatrati želve. Preostali period - bilo to 5 godina, desetljeće, dva, ili više - nazvan je "izgubljene godine" (naziv je skovao Archie Carr 1986) i ostao je tajna dugo vremena.

Od tada je znanost napredovala, te je razvojem novih metoda postalo moguće sveobuhvatnije istraživati morske kornjače i razotkriti neke tajne. Životni ciklus morskih kornjača je dugo vremena bio u grubo podijeljen u tri životna stadija: embrio, seksualno nezrele (juvenilne) jedinke, i odrasle (adultne) jedinke. Rezultati dobiveni razvojem novih metoda i primjenom ekoloških istraživanja omogućili su detaljnije definiranje ontogenetskih životnih stadija. Unutar seksualno nezrelog (juvenilnog) stadija, razlikujemo (i) tranzicijski period izleglih kornjačica u neritičkoj provinciji (duljina oklopa želvi manja od 15 cm), (ii) pelagičku razvojnu fazu u oceanskoj provinciji (želve duljine oklopa između otprilike 15 i 40 cm koje se hrane planktonom i drugim slobodno-plivajućim tj. pelagijalnim organizmima), te (iii) neritičku razvojnu fazu u neritičkoj provinciji (želve oklopa većeg od 30-50 cm koje uglavnom borave u priobalnom moru i hrane se pridne-nim i za dno pričvršćenim, tj. bentičkim organizmima). Ontogenetska promjena staništa (prijelaz iz otvorenog u priobalno more) događa se za većinu jedinki kada dosegnu određenu veličinu ili razvojni stadij, zbog čega je smatrano da ontogenetska promjena staništa kratko traje. Međutim, ova promjena staništa je ponekad postepena, ili do nje uopće ne dođe, rezultirajući time da se i neke odrasle jedinke hrane u staništima otvorenog mora.

Iako je provedeno mnogo studija i objavljeno mnogo literature na tematici glavatih želvi i morskih kornjača općenito, fokus određene studije je najčešće bila određena karakteristika ili određen životni stadij. Zbog (i) razlika u korištenju staništa, (ii) razlika u metodama uzorkovanja (primjerice postoji nekoliko načina mjerenja duljine oklopa, i nekoliko formula za preračunavanje jedne duljine u drugu; također, postoje različiti načini mjerenja brzine rasta (npr. markiranje i ponovni nalazi ili brojanje godišnjih prirasta na kostima), te (iii) različitih metoda analize podataka (primjerice proučavanje promjena duljine ili težine, te konstrukcije opisnih modela), objavljeni podaci nisu bili samo nepovezani, nego često i kontradiktorni. Većina neslaganja odnosila se na brzine rasta i modele rasta koji su bili objavljeni za različite populacije i životne stadije, na dogovor oko toga treba li kao "duljinu oklopa kod dostizanja spolne zrelosti" koristiti najmanju izmjerenu duljinu oklopa unutar određene populacije ili prosječnu duljinu oklopa pri gniježđenju za tu populaciju, te procjene za dob pri dostizanju spolne zrelosti, koje se kreću od 6 do 38 godina. Nadalje, nekoliko autora upozorilo je na bitne razlike među populacijama, od kojih je najočitija razlika između odraslih jedinki Mediteranske i drugih populacija, ali i na bitne razlike unutar iste populacije, kao što su različite brzine rasta i različite formule za preračunavanje jedne mjere oklopa u drugu.

Kako bih mogla riješiti tajnu "nestale plastike" i utjecaja plastike na glavate želve, morala sam znati još više o ekologiji i biologiji glavatih želvi: Koliko dugo im zaista treba kako bi

dosegle spolnu zrelost? Zašto neke glavate želve rastu brže od drugih? Zašto su glavate želve u Sjevernom Atlantiku veće od onih u Mediteranu? Da li se veće želve također i više razmnožavaju? Jesu li veličina i razmnožavanje posljedica okolišnih ili fizioloških čimbenika? Kako će se glavate želve nositi s okolišnim promjenama? Ili, konkretnije, kako dostupnost hrane, salinitet, i/ili temperatura mora djeluju na procese kao što su rast, sazrijevanje, održavanje, i reprodukcija? I - ukoliko želim doznati kako pojedena plastika utječe na te bitne procese koji su dio energijskog proračuna jedinki - koliko je uopće energije potrebno glavatoj želvi, i koliko energije može prikupiti u određenom vremenskom periodu?

Metode i rezultati

Definiranje i praćenje energijskog proračuna glavate želve bio je najlogičniji pristup, onaj koji će pružiti odgovore na većinu, ako ne i sva moja pitanja, jer bilo koji utjecaj pojedene plastike na vrstu mora biti vidljiv kao utjecaj na energijski proračun i/ili životni vijek te vrste. Odabrala sam teoriju dinamičkog energijskog proračuna (eng. *Dynamic Energy Budget*, DEB) kao stazu koja će me dovesti do mog "Svetog Grala": DEB modela glavate želve. Pristup ove teorije je sveobuhvatan: praćenje zakona termodinamike, nekoliko tipova homeostaze (ravnoteže) koju svaki sustav (od stanice preko jedinke do ekosustava) pokušava postići i održati, utjecaj hrane i temperature na energijski proračun, međuovisnost energijskog proračuna i procesa kao što su rast, održavanje, sazrijevanje, i reprodukcija. Dodatno, DEB teorija bila je i ostala jedna od najbolje razrađenih i dosljednih dostupnih teorija.

Općenito kada govorimo o energiji, masa je informativnija od duljine. Međutim, kako je samo jedna krivulja bila dovoljna za uspješno opisivanje odnosa duljine i mase za cijeli veličinski raspon jedinki iz nekoliko različitih populacija (Wabnitz and Pauly, 2008), fokusirala sam se na (dostupnije) podatke o duljini. Neslaganje u izrazima za preračunavanje mjera duljina oklopa bilo je početna točka mog istraživanja, jer neslaganje u izrazima koji preračunavaju iste dvije mjere oklopa navodi na zaključak da se oblik oklopa, odnosno želvi, razlikuje među različitim životnim stadijima i/ili populacijama. Razlike tog tipa mogu imati značajne implikacije kod modeliranja energijskog proračuna, jer je postojanost oblika životinje kroz životni ciklus (tzv. strukturna homeostaza ili izomorfija) jedna od pretpostavki DEB teorije. Eventualnu promjenu oblika (odstupanje od izomorfije) moguće je vrlo jednostavno uključiti u model putem promjene u koeficijentu oblika (δ_M), ali prvo je potrebno utvrditi koliko je promjena značajna. Koristeći podatke za sjeverno-atlantsku populaciju glavatih želvi za koju su nedosljednosti u izrazima za preračunavanje i pronađene, usporedila sam dvije različite regije ('sjevernu' i 'južnu') Sjevernog Atlantika, i tri različita životna stadija ('kornjačice i spolno nezrele jedinke otvorenog mora', 'spolno nezrele jedinke priobalnog mora', i 'odrasle jedinke').

Rezultati su upućivali na to da nema značajnih razlika kada se uspoređuju jedinke istog životnog stadija koje žive u različitim regijama, ali da treba biti oprezan kada se rezultati i zaključci vezani uz oblik donose na temelju analize najmanjih jedinki (životni stadij 'starijih kornjačica i spolno nezrelih jedinki otvorenog mora'), a primjenjuju na starijim životnim stadijima ('spolno nezrele jedinke priobalnog mora' i 'odrasle jedinke'), i obrnuto. Ipak, primijećene razlike u obliku nisu bile dovoljno značajne da bi opravdale uvođenje dodatnog koeficijenta oblika za pojedine životne stadije, jer je odstupanje od izomorije bilo manje od 5%. Ovakav zaključak implicirao je i da mogu koristiti standardni (najjednostavniji) oblik DEB modela u daljnjoj analizi.

Razvoj i formalni opis DEB modela čitavog životnog ciklusa glavate želve bio je drugi korak. Standardni DEB model opisuje jedinku prateći dinamiku tri odjeljka: "strukture", "rezerve", i "zrelosti", od čega je zadnji odjeljak povezan uz sazrijevanje i (nakon dostizanja spolne zrelosti) razmnožavanje. Prva dva odjeljka ("struktura" i "rezerva") mogu se direktno izmjeriti kao duljina i/ili masa jedinke, dok je treći odjeljak ("zrelost") formalno definiran kao uzastopno ulaganje energije kako bi se povećao stupanj složenosti organizma. Dinamika svakog pojedinog odjeljka je jedinstvena, i potpuno je određena parametrima modela koji su procijenjeni istovremeno. Početna pretpostavka bila je da će razlike među populacijama (sjeverno-atlantskom i mediteranskom), i utjecaj pojedene plastike na energijski proračun, biti vidljivi kao promjene u vrijednostima parametara ili kao promjene u predikcijama DEB modela. Prvo je dakle potrebno odrediti vrijednosti parametara. Postupak određivanja vrijednosti parametara (metoda kovarijacije) koristi istovremeno sve dostupne podatke o biologiji vrste (kao što su veličina i starost pri izlijevanju i dostizanju spolne zrelosti, te krivulje rasta, podatke o razmnožavanju, itd.) kako bi se ustanovio najizgledniji set vrijednosti parametara DEB modela. S obzirom na to da je unutar svake populacije prisutna velika varijabilnost u podacima, analiziranje više od jedne populacije istovremeno nije bila izgledna opcija. Koristeći prvo podatke za sjeverno-atlantsku populaciju - najveću (i vjerojatno najbolje izučavanu) populaciju glavatih želvi na svijetu - odredila sam set svih primarnih parametara za DEB model sjeverno-atlantske glavate želve. Model je pokazao jako dobro poklapanje s podacima koji su korišteni za određivanje parametara, i to od predviđanja trajanja inkubacije, brzine rasta u duljinu i težinu, do duljine oklopa pri dostizanju spolne zrelosti, i razmnožavanja. Dodatno, to što sam odredila vrijednosti parametara koji određuju čitav životni ciklus glavate želve, omogućilo mi je i da proučavam dnevni energijski proračun glavate želve. Rezultati su ukazivali da, dok kornjačice i mlade kornjače dnevno većinu energije ulažu u sazrijevanje i rast, odrasla jedinka koja je već dosegla punu veličinu koristi čak tri četvrtine energije na troškove metabolizma i održavanje stupnja zrelosti odnosno kompleksnosti. Također, istražila sam kako uhranjenost majke utječe na energijski proračun embrija: dok je hrane u okolišu dovoljno da majke mogu jesti do sitosti, embriju je za rast i razvoj dovoljno i manje od polovice početne energije dostupne u jajetu. Međutim, kada je hrane u okolišu manje, rezultirajući u 20% manjem normaliziranom unosu hrane, tada embrio za iste procese mora iskoristiti više od polovice početne energije u ja-

jetu. Ovo direktno određuje koliko će rezerve odnosno žumanjčane vrećice biti prisutno pri izlijevanju, što pak utječe na mogućnost preživljavanja kornjačica.

Rezultati su dakle omogućili interesantan uvid u životni ciklus glavate želve, a predviđanja modela su se jako dobro poklapala s većinom podataka. Međutim, kako to često biva, onim predviđanjima modela koja se *nisu* idealno poklapala sa podacima je posvećeno više pažnje. Konkretno, iako je trajanje embrionalnog razvoja (inkubacije) predviđeno sa zadovoljavajućom točnošću, model je predviđao veću veličinu pri izlijevanju od zabilježene. Predviđena dob pri dostizanju spolne zrelosti (13 godina), iako unutar raspona izračunatog i zabilježenog za glavate želve, niža je od dobi određene u većini novijih studija (20 ili više godina). Znači li to da glavate želve počinju ulagati energiju u razmnožavanje puno ranije nego što se trenutno smatra? Ili sam svojom pretpostavkom da se glavate želve prilagođavaju uvjetima u okolišu toliko efikasno da manje varijacije u okolišnim uvjetima nemaju bitnog utjecaja na njihov rast i ostale fiziološke procese (što rezultira između ostalog von Bertalanffijevom krivuljom rasta), pretjerano pojednostavila uvjete u prirodi? Interesantan rezultat bio je i rast kornjačica, jer su kornjačice rasle brže nego što je model (uzimajući u obzir njihov općenito brži metabolizam) predviđao. Je li moguće da kornjačice rastu brže jer je njihov metabolizam brži od onoga što model predviđa? Ovakav obrazac rasta je već prepoznat kao "rastrošno brzanje" (eng. "*waste-to-hurry*"), i prisutan je kod vrsta koje moraju brzo rasti, čak i kada to znači rastrošno korištenje dostupnih resursa. Evolucijski, brži rast kornjačica (koje se izliježu tijekom ljeta kad su resursi dostupni u izobilju) bio bi povoljan, jer su kornjačice najosjetljivije dok su male i primamljive brojnim predatorima. Istovremeno, brži rast kornjačica, kao i druga zabilježena odstupanja od predviđanja modela, mogli bi biti posljedica specifičnosti podataka (primjerice različita kvaliteta hrane kojom su kornjačice hranjene u odnosu na hranu kojom se hrane odrasle jedinke, i slično). Zbog toga je bilo potrebno proučiti zaseban set podataka koji opisuje neku drugu populaciju, kako bih mogla potvrditi ili odbaciti svoje sumnje i hipoteze.

Proučavanje mediteranske populacije, koja je manja na nekoliko različitih načina (manji broj manjih jedinki koje žive na manjem području), bio je treći veliki korak mog istraživanja. Kako bih dobila prvi uvid u to koliko se zapravo veličinski razlikuju jedinke iz sjeverno-atlantske i mediteranske populacije, kao i moguće uzroke tih razlika, analizirala sam podatke o veličini (duljini i masi) želvi iz tih populacija, te ih usporedila za dva trenutka u životu glavate želve: izlijevanje iz jaja i polijeganje jaja. U obzir sam također uzela veličinu jaja, jer su prethodne studije pokazale da veličina jaja (relativno konstantna unutar pojedinih populacija) može objasniti veliki dio razlike u veličini izleglih kornjačica tih populacija. Rezultati ovog prvog (morfološkog) dijela analize pokazali su da, u usporedbi sa sjeverno-atlantskom populacijom, mediteranske kornjače manje i pri izlijevanju i pri gniježđenju. Iznenađujuće je bilo što se omjeri mase i duljine na treću potenciju (tj. indeksi kondicija) nisu razlikovali između populacija. Međutim, razlikovali su se između razvojnih stadija. U diskusiji vezanoj uz ovaj dio analize, raspravljam o

nekoliko čimbenika koji su mogli uzrokovati razliku u veličini jedinki ovih dviju populacija: od uvjeta u gnijezdu tijekom inkubacije, do dostupnosti hrane u okolišu kasnije tijekom života kornjača. Nijedan od ovih čimbenika međutim nije mogao biti uzrokom tako velike razlike u prosječnoj veličini jedinki pri gniježđenju, a istovremeno podržavati stopu razmnožavanja koja je zabilježena u Mediteranu. Odgovor na ovu zagonetku otkriven je tek nakon određivanja parametara DEB modela za mediteranske glavate želve, i proučavajući implikacije modela. S obzirom na to da je u Mediteranu dostupno manje hrane, podaci o jedinkama koje sazrijevaju mlađe i pri manjoj veličini nisu bili intuitivni, jer je općenito u uvjetima s manje hrane jedinkama potrebno dulje vremena da dosegnu spolnu zrelost. Model je ukazao da je glavno objašnjenje niži stupanj zrelosti koje mediteranske jedinke moraju doseći kako bi postale spolno zrele, te da taj stupanj zrelosti proporcionalan njihovoj veličini. Implikacije ovog fenomena su dvojake: (i) mediteranske želve moraju uložiti ukupno manje energije kako bi postale spolno zrele, što znači da mogu doseći spolnu zrelost u ranijoj dobi i pri manjoj veličini nego sjeverno-atlantske želve, i (ii) mediteranske želve, nakon dostizanja spolne zrelosti, moraju dnevno ulagati manje energije za održavanje tog (maksimalnog) stupnja zrelosti, što znači da je dnevno više energije dostupno za razmnožavanje. Značajke koje je model predviđao (primjerice manja dob i veličina mediteranskih želvi pri dostizanju spolne zrelosti, ali stopa razmnožavanja jednaka onoj sjeverno-atlantskih želvi), bile su u skladu s izmjerenim podacima, a tehničko mehanističko objašnjenje bilo je u skladu s DEB teorijom. Model je predviđao veću veličinu kornjačica pri izlijevanju nego što je zabilježeno, te relativno nisku dob pri spolnom sazrijevanju, kao što je bio slučaj i za sjeverno-atlantske želve. Rast kornjačica, koji je unutar ovog poglavlja analiziran detaljnije i istovremeno za kornjačice iz obje populacije, potvrdio je da je metabolizam kornjačica tijekom analiziranog perioda uistinu veći od očekivanoga, rezultirajući bržim rastom. Ista analiza ukazala je i na moguće probleme u analizi izmjerenih brzina rasta, jer je podatak da mediteranske kornjačice rastu brže od sjeverno-atlantskih kornjačice iste starosti otkriven tek nakon što su brzine rasta standardizirane za istu referentnu temperaturu i količinu hrane (što je teško moguće napraviti koristeći klasične krivulje i podatke za rast). Dodatno, koristeći također DEB model simulirala sam značajnu promjenu u dostupnosti hrane tijekom života glavate želve, te gledala kakav utjecaj ta promjena ima na rast. Dobivena krivulja rasta odgovarala je dvofaznom rastu, što odgovara modelima rasta koje je predložila nekolicina autora, dok ih je većina koristila klasične (jednofazne) modele rasta. Dvofazni ili čak višefazni rast bi zapravo rezultirao i većom dobí pri dostizanju spolne zrelosti, te je model rasta koji bi svakako valjalo dodatno istražiti. Iako je ovako upečatljiva krivulja rasta značajan rezultat koji je u skladu sa podacima iz literature, nisam mogla sa sigurnošću tvrditi je li promjena u razini hrane jedina zaslužna za promjene u brzini rasta, ili je potrebno uzeti u obzir i temperaturu mora? I na koji točno način svaki od tih čimbenika utječe na cjelokupan energijski proračun i relevantne procese?

Posljednji dio mog putovanja (i posljednji dio disertacije) usmjeren je na proučavanje, prvo nezavisno a onda istovremeno, utjecaja hrane i temperature na energijski proračun.

Eksperimentalno je vrlo teško, ako ne i nemoguće, održavati uvjete nepromijenjenima tijekom cijelog života glavate želve (65 godina), a još je teže ovo postići za onoliko želvi koliko bi bilo potrebno za ispitati sve kombinacije hrane i temperature od interesa, nadajući se pri tome da su kornjače koje su u programu testiranja reprezentativne za svoju vrstu i/ili populaciju. Jedna od mnogih prednosti korištenja pristupa mehanističkog modeliranja je upravo mogućnost da se preispitaju ovakvi scenariji. Fokusirajući se opet na sjeverno-atlantsku populaciju, simulirala sam realistične raspone količine hrane i temperature kojima su izložene glavate želve. Utjecaj dostupnosti hrane odrazio se i na brzinu rasta, ali je bio najizraženiji na krajnju veličinu odraslih jedinki. Utjecaj temperature bio je najizraženiji za brzine rasta i sazrijevanja. Oba okolišna čimbenika značajno su utjecala na stopu razmnožavanja. Duljina oklopa pri spolnom sazrijevanju nije bila bitno različita niti za različitu dostupnost hrane, niti za različitu temperaturu, potvrđujući zaključke pojedinih autora da, usprkos tome što duljina pri dostizanju spolne zrelosti varira unutar određene populacije, u usporedbi s drugim značajkama predloženima za indikatore spolne zrelosti (dob, naglo usporavanje rasta), ovo je jedna od najmanje varijabilnih značajki. Rezultati su također potvrdili zaključke o unutarnjim (fiziološkim) razlikama koje omogućuju mediteranskim glavatim želvama spolno sazrijevanje pri manjim veličinama. Zatim sam, koristeći i model za mediteranske glavate želve, usporedila kako jedinke koje pripadaju različitim populacijama (i shodno tome se fiziološki razlikuju) reagiraju na iste okolišne uvjete. Ova simulacija je bitna jer su jedinke sjeverno-atlantske populacije često zabilježene u Mediteranu. Nedavno su brzine rasta i sazrijevanja jedinki sjeverno-atlantskog i mediteranskog podrijetla zasebno analizirane za Mediteran, što mi je omogućilo provjeru mojih rezultata. Rezultati dobiveni korištenjem DEB modela bili su u skladu s objavljenim rezultatima i zaključcima, uspješno reproducirajući brži rast i ranije sazrijevanje mediteranskih želvi. Dodatno, izuzetno niska reproduktivna stopa sjeverno-atlantskih želvi predviđena modelom dala je odgovor na pitanje zašto se sjeverno-atlantske želve ne gnijezde u Mediteranu.

Naposlijetku, na red je došao i onaj okolišni pritisak koji je i pokrenuo sve kotačiće - otpad porijeklom od ljudi, te utjecaj pojedene plastike na energijski proračun. Utjecaj na energijski proračun modeliran je u kontekstu sintetizirajućih jedinica, odnosno preciznije rečeno asimilacijskih jedinica (eng. *Assimilation Units*, AU) koje su općenito zadužene za pretvorbu pojedene hrane u rezervu i osiguravanje energije za sve potrebne procese (rast, sazrijevanje, održavanje sustava, i razmnožavanje). Pojednostavljeno, AU mogu biti ili zauzete obrađujući čestice hrane (ili neke inertne tvari) ili slobodne kako bi prihvatile novu česticu. Kada sve više čestica hrane postane zamijenjeno inertnim česticama plastike ili drugog otpada, tada je sve veći udio zauzetih AU zauzeto tim inertnim česticama, a bez ikakvog energijskog dobitka. Prvo sam pretpostavila da je vrijeme potrebno za obradu čestica plastike jednako onome potrebnome za obradu čestica hrane, i onda sam kvantificirala dugoročne posljedice one količine pojedene plastike koliko je bilo pronađeno u probavilu morskih kornjača. Podaci za volumni udio želuca glavatih želvi zauzet plastičnim otpadom kreću se od 0 do 25% (u prosjeku 3%), ali volumni udio čitavog pro-

bavnog sustava je vjerojatno veći obzirom da je udio plastičnog otpada u sadržaju crijeva veći od onoga u sadržaju želuca. Zatim, imajući na umu podatak kako je izmjereno vrijeme zadržavanja plastike u probavnom sustavu nekoliko puta veće od izmjerenog vremena zadržavanja hrane, simulirala sam scenarij gdje plastika koja zauzima 3% volumena probavnog sustava zahtjeva duže vrijeme obrade. Dakle, prvo sam simulirala raspon realnih količina pojedene plastike koja se u probavilu zadržava jednako dugo kao hrana, a zatim sam simulirala raspon različitih vremena zadržavanja plastike koja ukupno zauzima 3% volumena probavnog sustava. Utjecaj pojedene plastike pokazao se značajnim, izazivajući istovremeno u meni osjećaj znanstvenog ushita i moralne nevjerice. Pojedena plastika efektivno je imala jednake posljedice kao smanjen unos hrane, uzrokujući sporiji rast (odnosno povećanu opasnost od predatora), manju konačnu veličinu, i manju stopu razmnožavanja. Pod pretpostavkom jednakog vremena zadržavanja plastike i hrane u probavilu glavatih želvi, već je 14% volumena probavnog sustava ispušteno plastikom prouzročilo tako nisku stopu reprodukcije da je realno pretpostaviti da se glavate želve ne bi uopće razmnožavale (jednako niska stopa razmnožavanja predviđena je za sjeverno-atlantske jedinke u Mediteranu, čije gniježđenje na mediteranskim plažama uistinu nije često zabilježena pojava). Ako plastika zauzima veći postotak volumnog udjela probavnog sustava, jedinke nemaju dovoljno raspoložive energije niti da bi dosegle spolnu zrelost. Kada je vrijeme zadržavanja plastike simulirano kao tri ili više puta duže od vremena zadržavanja hrane, jednaki učinak postignut je već pri nižem udjelu plastike (3%). U prirodi, udio pojedene plastike nije konstantan, niti sve pojedene čestice imaju jednako vrijeme zadržavanja. Podjednako realne mogućnosti su i da: (i) glavate želve mogu podnijeti kratku (akutnu) izloženost količini plastike koja zauzima više od 14% volumena probavnog sustava i oporaviti se, te (ii) želva koja pojede i manju količinu otpada će umrijeti od izgladnjivanja, jer je (s obzirom na to da je do tada jela hranu u većim količinama) narasla do veće veličine i potrebno joj je više energije za održavanje, koju sada više ne može pribaviti u dovoljnoj količini.

Diskusija i zaključak

Rezultati istraživanja ove disertacije omogućili su novu perspektivu i nove spoznaje o životnom ciklusu glavate želve. Na moje veliko zadovoljstvo, brojna pitanja su odgovorena na zadovoljavajući način. Istovremeno, oblikovalo se nekoliko novih zanimljivih pitanja, na koja bih rado nastavila tražiti odgovore. Primjerice, zašto model predviđa da će veličina kornjačica pri izlijevanju biti veća nego što je zabilježeno, i to dosljedno za obje proučavane populacije? Može li taktika “rastrošnog brzanja” objasniti brži rast kornjačica, i vrijedi li ovo objašnjenje za sve populacije glavatih želvi, ili čak za sve vrste morskih kornjača koje su izložene sličnim okolišnim pritiscima? Uzrokuje li kombinacija manje količine dostupne hrane i niže temperature u pelagijalnom okolišu otvorenog

mora, te veće količine dostupne hrane i više temperature u neritičkom okolišu priobalnog mora, dvofaznu krivulju rasta kod većine spolno nezrelih jedinki? Mogu li ova dva obrasca, jedan kao rezultat metabolizma ("waste-to-hurry"), a drugi kao rezultat okoliša (promjene u količini hrane i temperaturi), istovremeno objasniti pretpostavku višefaznog rasta i neslaganje između novijih procjena (20-30 godina) i modelom procijenjene (13-15 godina) dobi pri dostizanju spolne zrelosti? Da li bi proučavanje utjecaja pojedene plastike, uzimajući u oblik takvu (višefaznu) krivulju rasta, rezultiralo predviđanjima za još višu dob pri dostizanju spolne zrelosti i još gorim scenarijima za budućnost populacija glavatih želvi? I, naposljetku, može li ovakvo produbljeno razumijevanje biologije i ekologije ove izvanredne vrste, te štetan utjecaj koji plastika ima na naš okoliš, objasniti zašto je brojnost nekih populacija glavate želve u opadanju usprkos zaštiti, te nas potaknuti da promijenimo svoje ponašanje?

